

АНАЛІТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ СТРУМИННОЇ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

Самойчук К.О., канд.техн.наук., доцент,
Ковальов О.О., аспірант

Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь

Анотація – у статті аналітично визначено головні параметри процесу струминної гомогенізації з роздільною подачею жирової фази.

Summary – the basic analytic parameters of the process jet-mixing homogenization of milk with the separat giving of creams are defined.

Ключові слова: аналітичні залежності, струминна гомогенізація, диспергування, процес.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Незважаючи на достатню увагу, що приділяється питанню зниження енергоємності процесу гомогенізації проблема й досі є актуальною. В зв'язку з цим інтерес представляє дослідження струменевого гомогенізатора. В ньому завдяки створенню максимальної різниці швидкостей між жировою кулькою та оточуючою дисперсійною фазою можливе досягнення високої ефективності процесу. та поєднання в установці гомогенізації та нормалізації за умови дозування вершків [1]. При подачі до пристрою гомогенізації молоко розділяється на знежирене молоко і вершки (рис. 1). Знежирене молоко подається під тиском з певною швидкістю v_m , яка збільшується у центральній зоні пристрою за рахунок звуження потоку, величину якого можливо регулювати тягами. У місці найбільшого звуження подаються вершки по тонкому каналу діаметром d_c . При взаємодії потоку та жирових кульок останні деформуються та подрібнюються.

Постановка завдання. Існує ряд гіпотез гомогенізації, що суперечать одна одній. Жодна з них вичерпно не показує сутність процесів, що відбуваються. Основна причина суперечностей в тому, що процес гомогенізації є важкодоступним для дослідження завдяки великим швидкостям процесу та малим розмірам часток. Аналізуючи існуючі гіпотези гомогенізації можливо стверджувати, що головним фактором в процесі диспергування жирової фази молока є різниця швидкостей між жировою кулькою та оточуючою дисперсійною фазою. Для ефективного дослідження процесу гомогенізації молока в струминному гомогенізаторі з роздільною подачею жирової фази необхідно теоретично обґрунтувати параметри процесу.

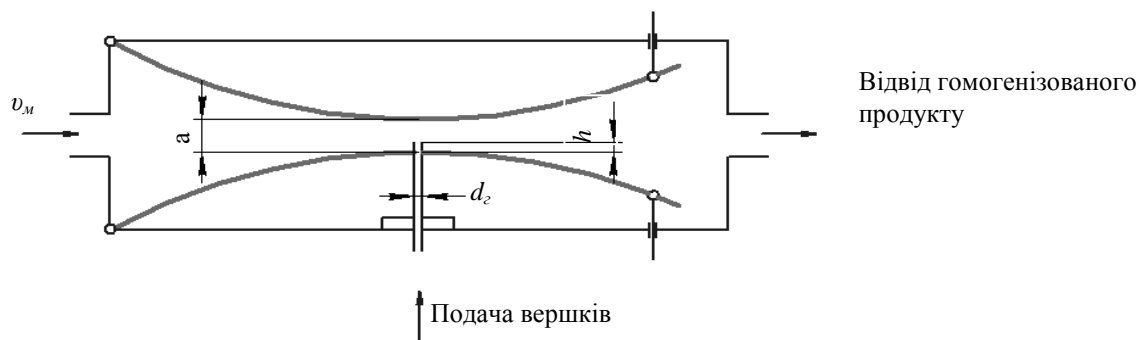


Рис. 1 – Схема струминного гомогенізатора з роздільною подачею вершків.

Виклад основного матеріалу дослідження. В струменевому гомогенізаторі з роздільною подачею вершків процес подрібнення жирових кульок відбувається в три етапи: на першому відбувається первинне диспергування жирової фази за рахунок різниці поверхневих натягів рідин; на другому – подрібнені жирові кульки попадають в хаотично пульсуючий інтенсивний турбулентний потік, краплі відриваються від струменю у місці найбільшого звуження полідисперсного потоку, в якому відбувається головне подрібнення за рахунок різниці в швидкостях потоків. На третьому етапі відбувається подрібнення за рахунок мікропульсацій рідини [2, 3].

Для дослідження процесу струменевої гомогенізації вихідними параметрами є: надлишковий тиск $\Delta p = 1 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$ Па, коефіцієнт швидкості $\phi = 0,95$, діаметр жирової кульки $d_k = 3 \cdot 10^{-6}$ м, коефіцієнт в'язкості $\nu = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, густина плазми $\rho_{пл} = 1035$ кг/м³, поверхневий натяг на границі жир-плазма $\sigma = 0,1$ Н/м. Діаметр сопла камери дорівнює згідно попередніх розрахунків $d_c = 4 \cdot 10^{-3}$ м.

Сила опору F при русі жирової частинки викликає перепад тиску Δp_k , Па, між внутрішній та зовнішніми фазами кульки, що деформує та розриває її. Для описання залежностей між параметрами v_l , d_k , $\rho_{ж}$, $\rho_{пл}$ v та F_o застосуємо відомі формули [4]

$$F_o = \frac{1}{8} Ne v_l^2 \pi d_k^2 \rho_{пл}, \quad (1)$$

де N_e — критерій Ньютона;

$v_l = v_m$ — швидкість потоку, м/с.

Критерій Ньютона визначається в залежності від характеру руху рідини, що в свою чергу залежить від безрозмірного критерію Рейнольда Re

$$Re = \frac{v_l d_k}{\nu}. \quad (2)$$

Швидкість знежиреного молока

$$v_l = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho_i} \Delta p}. \quad (3)$$

Швидкість струменю та число Рейнольдса за формулами (2) та (3) коливається в діапазоні значень $v_l = 43,1-96,5$ м/с; $Re = 114933-257333$. При $500 < Re < 200000$ режим руху турбулентний. При цьому

$$Ne = 0,45. \quad (4)$$

Середня швидкість рідини дорівнює

$$u = \sqrt{\frac{17,8\sigma}{d_k \rho_{пл}}}. \quad (5)$$

Перепад тиску Δp_k , Па, між внутрішній та зовнішніми фазами кульки, що деформує та розриває її

$$\Delta p_k = \frac{F_o}{\omega}, \quad (6)$$

де ω — площа миделеєвого перерізу, тобто проекції краплі на площину, перпендикулярну до напрямку швидкості, м².

$$\omega = \frac{\pi d_k^2}{4}. \quad (7)$$

Тоді

$$\Delta p_k = \frac{1}{2} Ne \rho_{пл} u^2. \quad (8)$$

При низькому перепаді тиску Δp_k крапля деформується, але не розривається завдяки поверхневому натягу, який обумовлює спрямований всередину перепад тиску Δp_σ , Па, який для жирової кульки буде дорівнювати [5]

$$\Delta p_\sigma = \frac{4\sigma}{d_k}. \quad (9)$$

Якщо Δp_k перевищує Δp_σ відбувається руйнування жирової кульки

$$\Delta p_k \geq \Delta p_\sigma. \quad (10)$$

При турбулентному русі рідини надлишковий тиск в камері гомогенізації, необхідний для руйнування жирової кульки за критерієм Вебера дорівнює після перетворень

$$\Delta p = \frac{2,7 \cdot 10^4 \cdot We \cdot \sigma \cdot H_m}{\varphi^2}. \quad (11)$$

Розрахунки проведені за рядом експериментів в широкому діапазоні чисел Лапласа та за граничних значень критерію Вебера показує, що критичне число $Re_{кр}$ для всіх випадків, відповідає режиму обтікання сфери з руйнуванням шару по миделевому перетину. Критичні умови дроблення крапель визначаються значенням числа Вебера, яке обумовлює початок руйнування крапель. Найбільш важливим параметром, що визначає стійкість та руйнування крапель є число Вебера [6].

$$We = \frac{u^2 d_n \rho_{пл}}{\sigma}, \quad (12)$$

де d_n — діаметр краплі в недеформованому стані.

Хінце для визначення подрібнення крапель пропонує відносно число Вебера та виразити його як відношення тангенційної напруги до міжфазного натягу [7]

$$We_{кр} = \frac{\theta \cdot d_{кр}}{\sigma}, \quad (13)$$

де θ – тангенційні напруження між краплею та рідиною, що є пропорційними турбулізації потоку.

Збільшення критерію Вебера показує, що тангенційні навантаження по відношенню до міжфазного натягу зростає, внаслідок збільшення деформації крапель. За досягнення критичних значень числа Вебера відбувається подрібнення крапель. При впливі на двофазне середовище потужних імпульсів тиску та швидкості може відбутись вибухове подрібнення, коли розпадання по всьому об'єму відбувається так швидко, що зрив поверхневого шару майже не помітний. Процес вибухового подрібнення розглянуто в [7]. При $We > 50$ зіткнення крапель супроводжуються вибуховим подрібненням, коли велика кількість вторинних крапель радіально розлітаються з зони взаємодії. Саме так і буде відбуватись процес подрібнення жирової кульки в розробленому гомогенізаторі. Отже, за формулами (5), (10), (13) середня швидкість $u = 41,4$ м/с; $399138 > 200000$; число Вебера $We = 53,2$.

Продуктивність гомогенізатора визначається кількістю молока, що проходить крізь нього за одиницю часу. Для струменевого гомогенізатору продуктивність в м³/с, Q_v , можна розрахувати за формулою [8]

$$Q_v = \mu \frac{\pi d_c^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho_{пл}} \Delta p}, \quad (14)$$

де μ — коефіцієнт витрати подаючого пристрою $\mu = 0,85$;

d_c — діаметр отвору подаючого пристрою, м.

Аналізуючи залежність (рис. 2) бачимо, що доцільним є використання гомогенізатору в діапазоні значень тиску 1-3 МПа. З графіку зрозуміло, що при збільшенні діаметру сопла при тій самій продуктивності буде зростати необхідний тиск диспергування, а з ним – енерговитрати та ступінь гомогенізації і навпаки. Тому, якщо завдається мінімальна ступінь гомогенізації (як частіше за все відбувається на практиці) при визначенні діаметру сопла камери гомогенізатору з дискретного ряду при певній продуктивності слід обирати менший з можливих діаметр сопла та коригувати значення тиску гомогенізації (яке при цьому збільшиться).

Або продуктивність, виражена в кг/год, Q_m

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \cdot 3600. \quad (15)$$

Вона знаходиться в наступному діапазоні значень: від 1728 кг/год при тиску 1 МПа до 3863 кг/год при тиску 5 МПа.

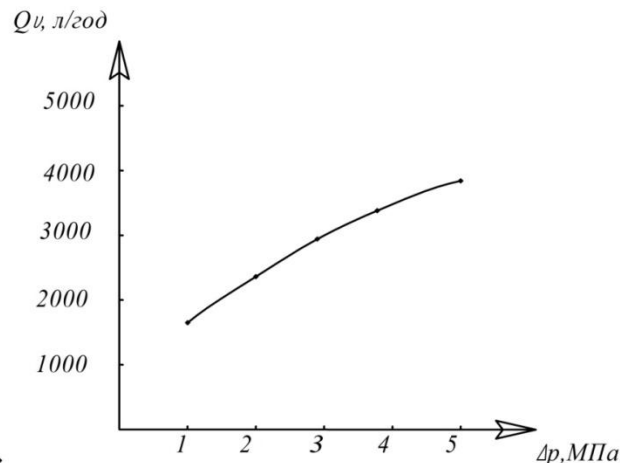


Рис. 2 – Графік залежності продуктивності гомогенізатору від надлишкового тиску.

Питомі витрати енергії гомогенізації E , Дж/кг, знайдемо за формулою

$$E = \frac{P}{Q_v \cdot \rho}, \quad (16)$$

де P — потужність, що витрачається на процес гомогенізації, Вт.

Потужність P можна знайти за такою формулою [9]

$$P = \Delta p \cdot Q_v. \quad (17)$$

Потужність коливається в діапазоні $P = 971 \dots 4869$ Вт.

Для гомогенізації, з урахуванням залежності середнього розміру жирових кульок від тиску матиме вигляд

$$D = \frac{We \cdot \sigma}{12,3\varphi^2 \Delta p}. \quad (18)$$

Питомі енерговитрати на гомогенізацію E_{num} , Дж/кг, визначаються з виразу

$$E_{num} = \frac{We_{\kappa} \cdot \sigma}{2 \cdot \rho_{nl} \cdot D_{max} \cdot \varphi^2}. \quad (19)$$

Отже, за формулою (18) питомі витрати енергії гомогенізатору молока залежать лише від надлишкового тиску у камері гомогенізатору. Але при зменшенні Δp також буде зменшуватись ступінь диспергування. Зниження питомих витрат енергії при незмінному ступеню гомогенізації H_m можливо досягти: зменшенням коефіцієнту поверхневого натягу на границі жир-плазма за допомогою, наприклад, емульгаторів, що використовуються при подрібненні клапанними і іншими видами гомогенізаторів [10].

Продуктивність розробленого гомогенізатору складається з об'ємів подачі знежиреного молока (дисперсійної фази) та жиру (дисперсної фази). Витрати рідини визначають як [11]

$$Q = Q_{жс} + Q_{зн}, \quad (20)$$

де Q — продуктивність гомогенізатору по готовому продукту, кг/год;

$Q_{жс}$ — продуктивність подачі жиру, кг/год;

$Q_{зн}$ — подача дисперсійної фази, кг/год.

$$Q_{жс} = \mu S \sqrt{\frac{2}{\rho_{nl}} \Delta p}, \quad (21)$$

де μ — коефіцієнт подачі;

S — площа перетину у вузькому місці, м².

$$S = h \cdot a, \quad (22)$$

де h — висота камери по внутрішньому розміру, м;

a — відстань між напрямлюючими, м.

Розпилену жирову фазу будемо розглядати як відкриту для зовнішніх впливів систему рухомих та взаємодіючих жирових крапель та суцільної середи. Відстань між напрямлюючими змінюється від 0 до 10 мм. Витрати крізь голку можна розглядати як витрати крізь дросель. При відстані між напрямлюючими 1 мм та тиску 1 МПа витрати складуть $1,5 \cdot 10^{-4}$ м³/с; при відстані 10 мм та тиску 1 МПа — $1,5 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В статті теоретично обґрунтовано головні аналітичні параметри процесу струменевої гомогенізації та надано його залежності. Розрахунки показують, що струминний гомогенізатор з роздільною подачею жирової фази має питомі енерговитрати нижче за існуючі струминні гомогенізатори при ступені диспергування на рівні клапанних.

Література

1. Самойчук К.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків/ Праці Таврійського державного агротехнологічного університету – Мелітополь: ТДАТУ. – 2011. – С.77–84.
2. Самойчук К.О. Обґрунтування параметрів та режимів роботи протитечійно-струменевого диспергатора молока: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук.: 05.18.12. Донецьк, ДонНУЕТ. – 2008. – 20 с.
3. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. – Ленинград: Государственное научно-техническое издательство химической литературы. – 1963. – 417с.
4. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Експериментальні дослідження струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази/ Обладнання та технології харчових виробництв –Донецьк: ДонНУЕТ. – 2011. – Вип. 28. – С.42 – 47.
5. Гиргидов А.Д. Техническая механика жидкости и газа. – СПб.: СПбГТУ. – 1999. – 395 с.
6. Пажи Д.Г Основы техники распыливания жидкости. – М.: Химия 1984. – 256с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа. – 2003. – 840 с.
8. Никитин.О.Ф. Гидравлика и гидروпневмопривод. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – 414 с.
9. Деркач.С.Р. Реология пищевых эмульсий. – Вестник Мурманского ГТУ. – 2012. – т.15, №1. – 84-95с.
10. Самойчук К.О. Вплив відстані між соплами форсунок на параметри протитечійно-струменевого гомогенізатора молока/ Праці Таврійського державного агротехнологічного університету – Мелітополь: ТДАТУ. – 2006. – Вип. 44. – С. 49–53.
11. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Эколит. – 2011. – 728с.